



XIII. MAGYAR MECHANIKAI KONFERENCIA

MaMeK, 2019

Miskolc, 2019. augusztus 27-29.

NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉL HEGESZTETT ZÁRT SZELVÉNYEK LOKÁLIS HORPADÁSI ELLENÁLLÁSA

Somodi Balázs¹ és Kövesdi Balázs²

^{1,2} BME, Hidak és Szerkezetek Tanszék Tanszék

1111 Budapest, Műgyetem rkp. 3.

somodi.balazs@epito.bme.hu, kovetsdi.balazs@epito.bme.hu

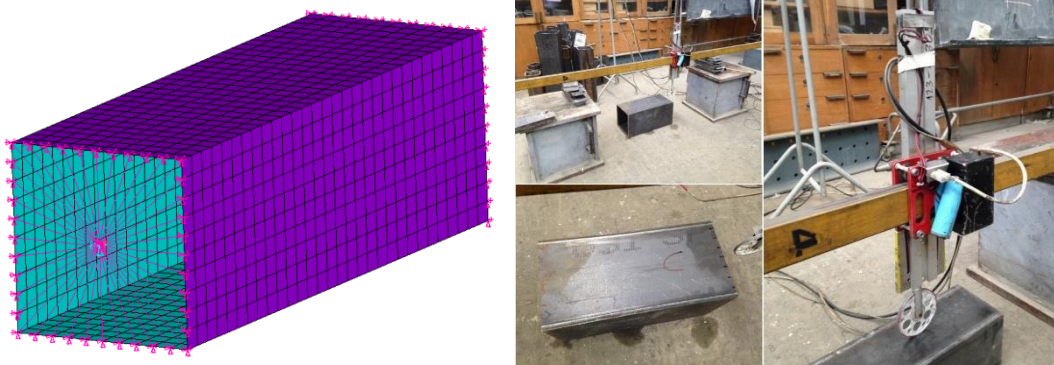
Absztrakt: Építőmérnöki szerkezetek tervezése során a lokális horpadási jelenség pontos figyelembevétele és a hatékony szélesség meghatározása kiemelt fontosságú a gazdaságos és kellő pontosságú méretezéshez. Az EN 1993-1-5 szabványban szereplő számítási módszer a hatékony szélesség meghatározására elsősorban I-szelvények hajlítónyomatékkal terhelt vizsgálatai alapján került kidolgozásra. Több szakirodalmi vizsgálat is azt igazolja, hogy ez a számítási eljárás túlbecsülheti a lokális horpadási ellenállás nagyságát, főként tiszta nyomóerővel terhelt négyzet keresztmetszetű zárt szelvények esetében. Jelen tanulmány célja, hogy (1) megvizsgálja a hegesztett négyzet keresztmetszetű zárt szelvények horpadási ellenállását tiszta nyomási és tiszta hajlítási igénybevétel esetén, és (2) értékelje a Winter-görbe alkalmazhatóságát ezekre az esetekre vonatkozóan. További célja a tanulmánynak, hogy (3) megvizsgálja az acél anyag folyáshatárának a lokális horpadási ellenállásra gyakorolt hatását, illetve elemezze, hogy van-e számottevő különbség normál szilárdságú (NSS) és nagyszilárdságú (HSS) acélok között a lokális horpadási viselkedésben. Numerikus és kísérleti kutatást hajtottunk végre négyzet keresztmetszetű, zömök zárt szelvények sajátfeszültségének, lokális geometriai imperfekciójának és horpadási ellenállásnak meghatározására S235 és S960 közötti szilárdsági osztályú acél próbatesteken.

Kulcsszavak: lokális horpadási ellenállás, hegesztett négyzet keresztmetszetű zárt szelvény, sajátfeszültség, geometriai imperfekció

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a nagyszilárdságú acélok (HSS – S420 és magasabb szilárdsági osztályú acélok S960-ig) alkalmazása az építőmérnöki gyakorlatban egyre nagyobb ütemben növekszik a HSS szerkezetek számos előnyös tulajdonságának köszönhetően. A nagyszilárdságú acélból készült szerkezeti elemek stabilitási viselkedésének pontos ismerete kiemelt fontosságú, mivel ezen szerkezeteknél a magasabb szilárdsági osztály miatt a tervezők általában karcsúbb szelvényeket alkalmazhatnak, melyek stabilitásvesztésre érzékenyek lehetnek. A hatályos Eurocode szabvány (EN 1993-1-1 [1], EN 1993-1-5 [2]) S460-as acél anyagminőségig érvényes. Ugyan az EN 1993-1-12 [3] lehetővé teszi a HSS acélok alkalmazását és szabványos méretezését S700-as szilárdsági osztályig, de a lokális horpadási ellenállás meghatározására vonatkozóan ugyanazt a számítási módszert (Winter-görbét) adja mindkét szabvány. Szakirodalmi vizsgálatok eredményei azt mutatják, hogy sok esetben – normál szilárdságú acélok esetén is – az Eurocode szükséges biztonsági szintje nem igazolható a Winter-görbe alapú szabványos méretezési eljárás alkalmazásával. Ebből kifolyólag a horpadási ellenállás számítása mind a nagyszilárdságú, mind az alacsony szilárdságú acél anyagból készült szerkezetek esetén felülvizsgálatot, illetve módosítást igényel.

Csuklós-csuklós megtámasztású lemezek horpadási ellenállásának meghatározására Schillo és társai [4] egy kísérleti adatbázison alapuló új méretezési formulát dolgoztak ki, mely garantálja az Eurocode által előírt megbízhatósági szintet. A jelen tanulmány determinisztikus és sztochasztikus módon végzett numerikus számításokkal egészíti ki az említett kísérleti kutatást. A kísérleti és numerikus eredmények alapján célunk olyan horpadási görbének a kidolgozása, ami teljesíti az Eurocode által megkövetelt biztonsági szintet és mind kísérleti, mind numerikus úton igazolt széles paraméter tartományban. Az elvégzett numerikus kutatási program eredményeként tervezési horpadási görbéket határoztunk meg különböző b/t arányokkal rendelkező négyzet és téglalap keresztmetszetű zárt szelvényekre. A horpadási görbét tiszta nyomás, tiszta hajlítás és kombinált nyomás és hajlítás esetére is kidolgoztuk. Az acél anyag szilárdságára vonatkozóan a vizsgálati spektrumunk S235 – S960 közé esik. Az alkalmazott numerikus modellt és a modell adatainak valószínűségi eloszlásához végzett kísérleti próbatestet az 1. ábra mutatja be. Az alkalmazandó horpadási görbék validált numerikus modellen végzett GMNI analízissel kerültek meghatározásra determinisztikus analízis alkalmazásával. A szelvények geometriáját, anyagminőségét, geometriai imperfekcióját és sajátfeszültségét figyelembe véve határoztuk meg a javasolt horpadási görbéket. A numerikus szimuláció alapján meghatározott horpadási görbéket értékeltük és összehasonlítottuk a szabványos Winter-görbével, illetve Schillo és társai [4] által javasolt méretezési eljárással.



1. ábra. Alkalmazott numerikus modell és kísérleti próbatest

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS ÉS KUTATÁSI STRATÉGIA

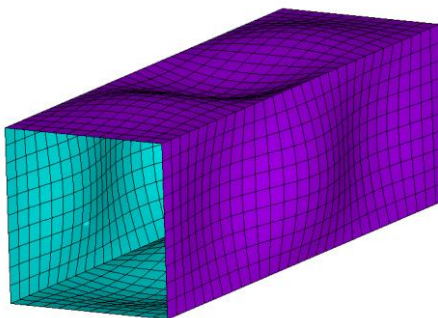
A lokális horpadási ellenállás meghatározására vonatkozó, az EN 1993-1-5 [2] szabványban szereplő számítási modell Kármán Tódor 1932-ben publikált [5], hatékony szélesség alapú módszerén alapszik. Ezt George Winter félempirikus elven továbbfejlesztette, megalkotva az 1947-ben publikált Winter görbét [6]. 1968-ban Winter módosította a saját képletét egy kísérletsorozat alapján, ami hajlítással terhelt hidegen alakított szelvények vizsgálatából állt, ezt a módosított formulát tartalmazza a jelenlegi Eurocode szabvány. Később több kutató is megkérdőjelezte a Winter-görbe alkalmazhatóságát, megfelelőségét, illetve néhányan új módszereket is javasoltak [7]-[16],[4]. A nemzetközi szakirodalom azt mutatja, hogy számos kísérleti és numerikus vizsgálat szolgáltat alacsonyabb teherbírási értékeket a Winter-görbe által kapható ellenállásoknál. Ezek alapján megállapítható, hogy a Winter-görbe szerinti eljárás nincs minden esetben a biztonság oldalán sem NSS, sem HSS szerkezetek esetén. Emiatt az Eurocode-ban szereplő, zárt szelvények belső lemezei horpadási ellenállására vonatkozó számítási eljárás további vizsgálatokat igényel. Jelen tanulmányban egy numerikus modellt dolgoztunk ki tisztán hajlított, illetve tisztán nyomott hegesztett zárt szelvények horpadási ellenállásának meghatározására. Több szilárdsági osztály is megvizsgáltunk S235 és S960 szilárdsági osztályok között, így szolgáltatva eredményt NSS és HSS típusú acélokra egyaránt. A tanulmányban két vizsgálati szintet különböztetünk meg az alábbiak szerint:

- analízis az EN 1993-1-5 [2] helyettesítő geometriai imperfekciójának figyelembe vételével,
- analízis valós geometriai imperfekciók és sajátfeszültségek figyelembe vételével.

A két vizsgálati szint által kapott ellenállási értékeket összehasonlítottuk, az eredményeket értékeltük. A jelen cikkben kizárólag a tisztán nyomott esetre vonatkozó eredményeket mutatjuk be.

3. NUMERIKUS MODELL ÉS VALIDÁCIÓ

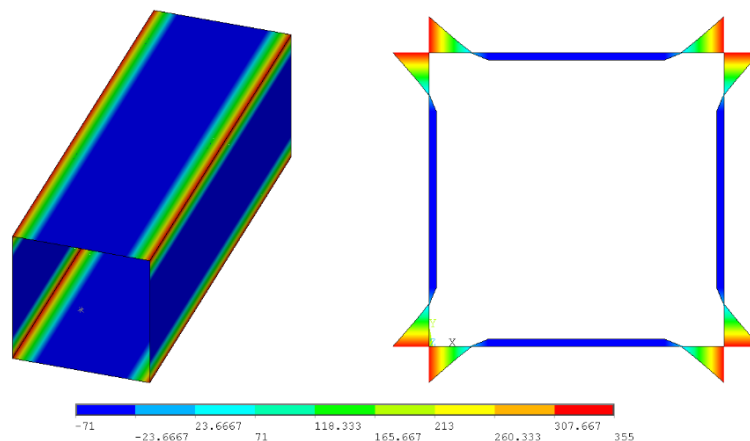
A numerikus modell ANSYS programkörnyezetben kidolgozott héjmodell. A horpadási ellenállás meghatározása GMNI analízissel történt figyelembe véve a geometriai imperfekciókat (2. ábra) és a sajátfeszültségeket (3. ábra). A hálóméret a keresztmetszet szélességének 1/10-ére lett felvéve, ennek meghatározását konvergencia-vizsgálattal igazoltuk. A szelvények hossza a keresztmetszet szélességének háromszorosára lett felvéve, így globális értelemben megfelelően zömök kialakításokat vizsgáltunk, így elkerülve a kihajlás jelenségét. A lokális imperfekciós alakot lineáris stabilitásvesztési analízissel (LBA) határoztuk meg. Az első sajátalakot tekintettük az imperfekciós alaknak, ez minden esetben három felszínusz hullámból állt. Az imperfekciók nagyságára az első vizsgálati szint esetén a helyettesítő imperfekciókat alkalmaztuk (ekkor sajátfeszültséget nem vettünk figyelembe).



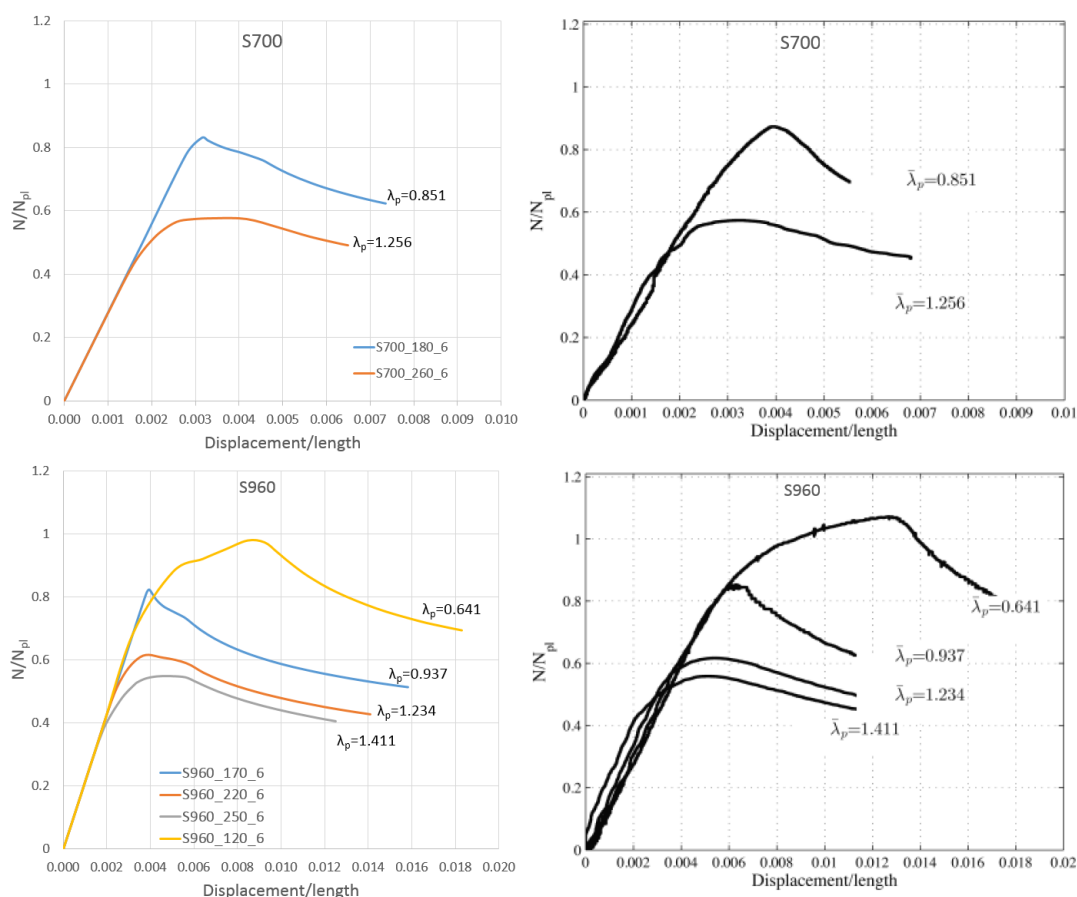
2. ábra. Nagyított lokális imperfekció alakja tiszta nyomás esetén

A második vizsgálati szinthez a geometriai imperfekció nagyságát Kövesdi, Somodi és Hornyák [17] munkája alapján vettük fel. A sajátfeszültségek meghatározása Somodi és Kövesdi [18] munkája alapján történt. Az anyagi viselkedést NSS típusú szilárdsági osztályoknál lineáris, folyási platóval rendelkező, majd felkeményedő anyagmodellel vizsgáltuk, míg HSS típusú anyagoknál a Ramberg-Osgood modellt alkalmaztuk.

A modell validálása Schillo és Feldmann [15] kísérleti vizsgálatainak alapján történt; akik 34 darab zömök HSS (S500MC, S700MC and S960MC) zárt szelvényt vizsgáltak, a validáció a 34-ből 8 véletlenszerűen kiválasztott próbatestre történt úgy, hogy minden vizsgált szilárdsági osztályból legalább kettőt tartalmazott a validáció. A kísérleti ellenállások és a modellünk által kapott teherbírási közötti átlagos eltérés 3,3%-ra adódott. A 4. ábrán látható a kísérleti és numerikus erő-elmozdulás görbék összehasonlítása. Ezek alapján megállapítható, hogy a modellel megbízhatóan meghatározható hegesztett zárt szelvények horpadási ellenállása.



3. ábra. Alkalmazott sajátfeszültség eloszlás



4. ábra. Modell validáció (balra a numerikus modell, jobbra a szakirodalmi kísérleti eredmények)

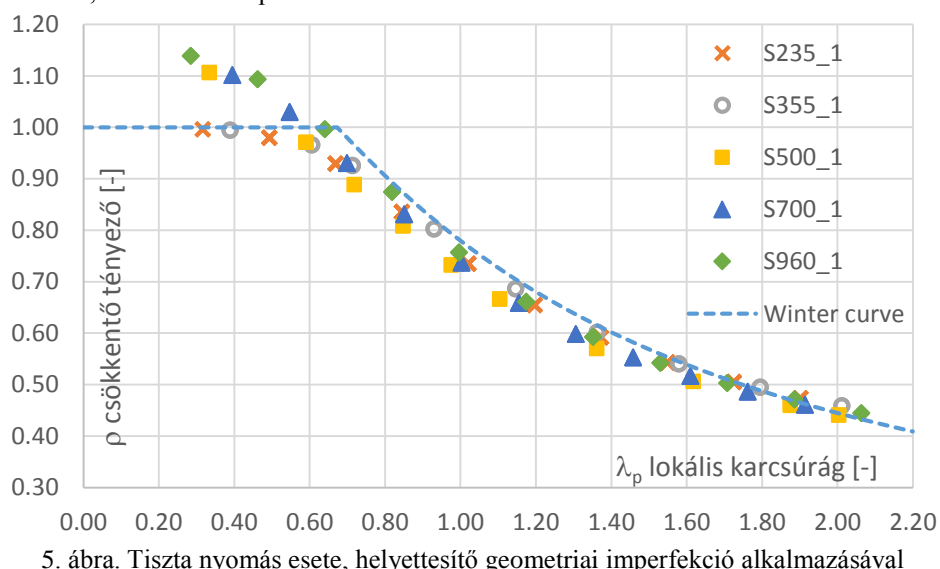
4. NUMERIKUS ANALÍZIS

4.1 Vizsgálati stratégia

A numerikus vizsgálatok során determinisztikus elven határoztuk meg az egyes vizsgált geometriai kialakítások teherbírását két vizsgálati szintet figyelembe véve. A numerikus teherbírások az alábbi geometriai illetve anyagi esetekre lettek meghatározva: négy különböző lemezvastagság (4, 8, 12 és 16 mm), öt különböző szilárdsági osztály (S235, S355, S500, S700, S960), továbbá ezeken belül a keresztmetszet szélességének változtatásával kb. 10 különböző lokális karcsúsági értékkel rendelkező eset vizsgálata történt meg. Ezekkel a paraméterekkel 0,4 - 2,0 közötti lokális karcsúsági tartományt vizsgáltunk. A vizsgálatok eredményeképpen kapott numerikus teherbírási érték alapján visszszámítottuk a ρ csökkentő tényezőnek az értékét, amelyet alkalmazva a nyomott oldalakra (nyomás esetén mind a négyre, hajlítás esetén csak a nyomott övre) visszakapható a numerikus modell szerinti teherbírás. Ezeket az értékeket ábráztuk a $\rho - \lambda$ koordináta rendszerben, ahol így már egy az egyben összehasonlíthatók a numerikus eredmények az Eurocode szerinti Winter-görbével.

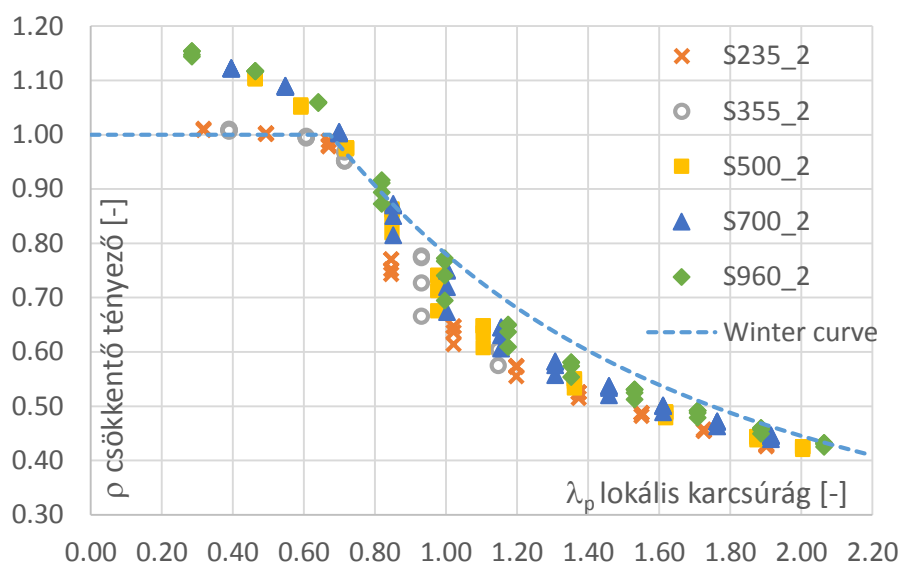
4.2 Numerikus eredmények tiszta nyomás esetén

Tiszta nyomás esetén az első vizsgálati szint eredményeit mutatja az 5. ábra. Látható, hogy ebben az esetben mind az öt szilárdsági osztály közelítőleg ugyanazt a horpadási görbét eredményezi, ami jó egyezést mutat a Winter-görbével. Ez azt mutatja, hogy az Eurocode által javasolt $b/200$ -as helyettesítő imperfekció értéke megfelelően van kalibrálva az Eurocode által alkalmazott Winter-görbe biztonsági szintjére. A képlékeny tönkremeneteli tartományban (kis karcsúságok) eltérés figyelhető meg az NSS (S235, S355) és a HSS (S500, S700, S960) típusú anyagok között. Ennek magyarázata, hogy a HSS típusú acél anyagoknak nincsen tiszta folyási platója és az egyezményes 0,2%-os folyási határnál nagyobb feszültségek is ki tudnak alakulni az anyagban kisebb alakváltozási szinten, mint az NSS típusú viselkedés esetén.

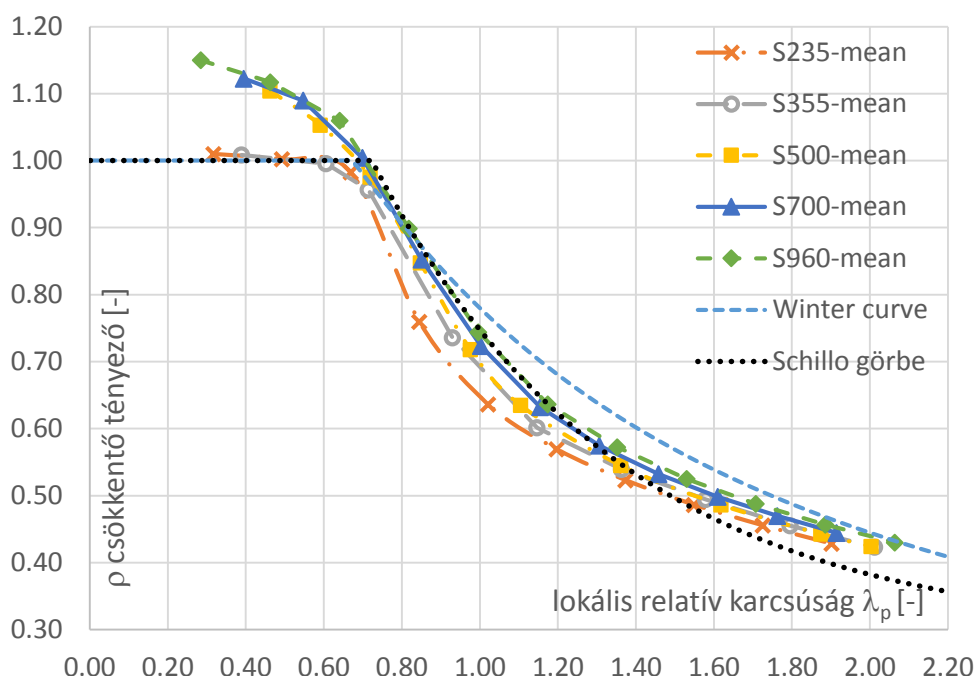


5. ábra. Tiszta nyomás esete, helyettesítő geometriai imperfekció alkalmazásával

A 6. ábra mutatja a második vizsgálati szintet, amikor a helyettesítő imperfekció helyett már valós geometriai imperfekciót alkalmazunk kiegészítve a sajátfeszültségekkel. Ebben az esetben megfigyelhető, hogy különböző teherbírási értékek tartoznak egy adott szilárdsági osztályhoz egy adott karcsúság esetén. Ez azt jelenti, hogy a lokális karcsúságot változatlanul hagyva, de változtatva a lemezvastagságot eltérő viselkedést kaphatunk. Ez a viselkedés az alkalmazott sajátfeszültség-modell hozománya, ugyanis eszerint a nyomó-sajátfeszültség értéke, ami kritikus a horpadási jelenség szempontjából, függ a lemezvastagság értékétől. Vastag lemezek esetén kisebb nyomó sajátfeszültségeket vehetünk figyelembe azonos b/t arányú eseteket összehasonlítva. Emiatt vastagabb lemezek esetén nagyobbra adódik a horpadási teherbírás azonos lokális karcsúságokat összehasonlítva. Ugyanakkor megfigyelhető, hogy ez a jelenség csak a középső karcsúsági tartományban számottevő (kb. $0,8 < \lambda < 1,3$), ugyanis ebben a tartományban van számottevő hatása a sajátfeszültségnek, amikor rugalmas-képlékeny tönkremenetel alakul ki. Alacsonyabb karcsúságok esetén a tönkremenetel inkább képlékeny tartományban alakul ki, míg magasabb karcsúságok esetén a tönkremenetel során a szerkezet rugalmas tartományban marad. Képlékeny és rugalmas tönkremenetel esetén is elmondható, hogy a sajátfeszültség megléte illetve nagysága nem befolyásolja számottevően a stabilitásvesztési ellenállás értékét. Az 5. és 6. ábrát összehasonlítva látható, hogy (elsősorban az előbb definiált középső karcsúsági tartományban) a második vizsgálati szint alacsonyabb teherbírási értékeket eredményez, mint a helyettesítő imperfekciók használata, továbbá látható az is, hogy a kapott teherbírási szintek a Winter-görbe alatt helyezkednek el.



6. ábra. Tiszta nyomás esete, geometriai imperfekció + sajátfeszültségek



7. ábra. Tiszta nyomás esete, geometriai imperfekció + sajátfeszültség, átlagos értékek

A teherbírasi értékeket tovább értékelve a 7. ábrán bemutatjuk az eredményeket úgy, hogy az egy karcsúsághoz és szilárdsági osztályhoz tartozó különböző lemezvastagságokhoz tartozó különböző teherbírasi értékeket átlagoltuk. A diagram alapján megfigyelhető, hogy minél magasabb a szilárdsági osztály, a horpadási görbe annál magasabban helyezkedik el. Ez szintén a sajátfeszültség-modell tulajdonságával magyarázható, ugyanis a nyomó-sajátfeszültség értéke nem függ a folyáshatártól, csak a geometriától, emiatt nagyobb szilárdsági osztályok esetén a nyomó sajátfeszültségnek és a folyáshatárnak az aránya alacsonyabb, mint kisebb szilárdsági osztályok esetén. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy még S960-as szilárdsági osztályú anyag esetén is a Winter-görbénél alacsonyabban helyezkedik el a numerikus horpadási görbe. A 7. ábrán továbbá feltüntettük Schillo és társai [4] által javasolt horpadási görbét is. Látható, hogy ez jobban közelíti a numerikus eredményeket, mint a Winter görbe. Nagyszilárdságú acélok, illetve kb. 1,4-nél alacsonyabb karcsúságok esetén kimondottan jó egyezés van a javasolt görbe és a numerikus eredmények közt. 1,5-nél magasabb karcsúságok esetén viszont a javasolt görbe a numerikus eredmények alá esik, így nagy karcsúságok esetén a módszer kissé alul becsülheti a valós teherbírás.

5. KONKLÚZIÓ

A determinisztikus numerikus eredmények alapján megállapítható, hogy a Winter-görbe nincs a biztonság oldalán, amennyiben tisztán nyomott, hegesztett, négyzet szelvények horpadási ellenállásának meghatározására használjuk. A Schillo és társai [4] által javasolt horpadási görbe jobb egyezést mutat a numerikus eredményekkel, mint a Winter-görbe. Ahhoz, hogy biztosítsuk az Eurocode által megkövetelt biztonsági szintet vagy új horpadási görbét kell választani, vagy változtatni kell a vonatkozó parciális tényező értékét. A Winter-görbe használata melletti szükséges parciális tényező nagysága meghatározható sztochasztikus numerikus vizsgálatok alapján. A szerzők jelenleg ezen a kutatási irányvonalon dolgoznak.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A jelen kutatás és cikk az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-4-III kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának és az MTA Bolyai János Kutatói Ösztöndíjának támogatásával készült, mely támogatásokért a szerzők köszönetüket fejezik ki.

HIVATKOZÁSOK

- [1] EN 1993-1-1. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN. 2009.
- [2] EN 1993-1-5. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements, CEN. 2006.
- [3] EN 1993-1-12. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-12: Additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S700, CEN. 2007.
- [4] N. SCHILLO, A. TARAS, M. FELDMANN: Assessing the reliability of local buckling of plates for mild and high strength steels, *Journal of Constructional Steel Research* 142:86-98, 2018.
- [5] KÁRMÁN T., SECHLER E.E., AND DONNELL L.H: "the strength of thin plates in compression, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 54, 53–57, 1932.
- [6] WINTER G: Strength of thin steel plates compression flanges, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 112(1), 527–554, 1947.
- [7] CLARIN M: High Strength Steel: Local Buckling and Residual Stresses, *Licentiate*, Lulea University of Technology, Lulea, 06.12.2004.
- [8] KUHLMANN U. AND KÖVESDI B: Partial safety factor for plate buckling, *ECCS/TC8 Meeting*, Coimbra, 27 October 2017.
- [9] NISHINO F., UEDA Y. AND TALL L: Experimental Investigation of the buckling of plates with residual stresses", *Lehigh University*, 1966.
- [10] RASMUSSEN K.J.R. AND HANCOCK G.J: Plate slenderness limits for HSS sections, *Journal of Constructional Steel Research*, 23(1–3), 73–96, 1992.
- [11] BRIDGE R.Q. AND O'SHEA M.D: Behaviour of thin-walled steel box sections with or without internal restraint, *Journal of Constructional Steel Research* 47(1–2), 73–91, August 1998.
- [12] PIRCHER M., O'SHEA M.D. AND BRIDGE R.Q: The influence of the fabrication process on the buckling of thin-walled steel box sections, *Thin-Walled Structures* 40(2), 109–123, February 2002.
- [13] SHI G., ZHOU W., BAI Y. AND LIN C: Local buckling of 460 MPa high strength steel welded section stub columns under axial compression, *Journal of Constructional Steel Research*, 100, 60–70, September 2014.
- [14] SHI G., XU K., BAN H. AND LIN C: Local buckling behavior of welded stub columns with normal and high strength steels, *Journal of Constructional Steel Research*, 119, 144–153, March 2016.
- [15] SCHILLO N. AND FELDMANN M: Local buckling behaviour of welded box sections made of high-strength steel - Comparing experiments with EC3 and general method, *Steel Construction – Design and Research* Vol. 8. September 2015, No. 3.
- [16] SCHILLO N., TARAS A. AND FELDMANN M: Assessment of safety factor for local buckling, *CEN/TC250/SC3/WG5 Meeting Stuttgart*, 26 February 2016.
- [17] KÖVESDI B, SOMODI B, HORNYÁK T: Local buckling resistance of welded box section columns, *8th International Conference on Thin-Walled Structures*, Lisbon, July 2018.
- [18] SOMODI B, KÖVESDI B: Residual stress measurements on welded square box sections using steel grades S235–S960, *Thin-Walled Structures* 123, 142–154, February 2018.